Iranian Food Science and Technology
Research Journal
Homepage: https://ifstrj.um.ac.ir

Research Article
Vol. 20, No. 1, Mar.-Apr., 2024, p. 63-74

Evaluation of Bubbling Process in Reducing Ultrafiltration Membrane Fouling and Its Efficiency During Refining of Raw Beet Juice

M. Soleymani[1], V. Hakimzadeh [2]*, M. Shahidi Noghabi[3], A. Arianfar[2]

1 and 2- Ph.D. Student and Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Quchan Branch, Islamic Azad University, Quchan, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: v.hakimzadeh@iauq.ac.ir)
3 -Associate Professor, Department of Food Chemistry, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST), Mashhad, Iran

Received: 10.07.2022 Revised: 24.09.2022 Accepted: 08.10.2022 Available Online: 22.11.2023	**How to cite this article:** Soleymani, M., Hakimzadeh, V., Shahidi Noghabi, M., & Arianfar, A. (2024). Evaluation of bubbling process in reducing ultrafiltration membrane fouling and its efficiency during refining of raw beet Juice. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, *20*(1), 63-74. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2022.77642.1190

Introduction

Appropriate and effective decolorization of raw and thin juice in sugar refineries is considered as an important process to obtain premium quality sugar, which due to the problems of its conventional process, membrane processes as effective and environmentally friendly processes can be used in parts of sugar industries. Among the disadvantages of the usual methods to remove membrane fouling, it can be mentioned the destruction of the membrane, environmental pollution, the remaining detergents in the membrane and the product, especially in the pharmaceutical and food industries, and the increase in production costs. Therefore, it seems that physical methods such as pre-filtration of the incoming feed, using turbulent and pulse currents to prevent excessive compression of the gel layer formed on the membrane surface are more effective and have fewer disadvantages. One of the ways to change the flow of feed entering the membrane surface is bubbling, which causes mixing the flow and increases the tangential shear stress. In fact, the hydrodynamic force that creates bubbles causes both the dragging force and the lifting force and leads to the removal of fouling and reducing the phenomenon of concentration polarization.

Materials and Methods

In this research, an ultrafiltration membrane (MWCO=10 KDa) pilot with a flat module (effective surface 40 square centimeters) was used to purify raw beet juice (which had passed a stage of pre-treatment with microfiltration) at the temperature of about 30 degrees Celsius and a trans membrane pressure of 3.5 bar during the process. Nitrogen gas in the amount of 0.5, 1 and 1.5 liters per minute was used in two continuous and interrupted modes for bubbling. In this way, in the interrupted mode, after every 3 minutes of filtration, the filtration process was carried out with gas for one minute. The factors such as flux, fouling and membrane resistance as membrane efficiency's factors and parameters like color, purity and turbidity as purification factors was investigated in the form of a completely random design and compared with control filtration conditions (without bubble generation). The results of this research were statistically analyzed using SAS (version 1.9) and Microsoft Office Excel 2019 software. The average data of each test in three repetitions was compared with the least significant difference (LSD) test at the 95% level.

Results and Discussion

Increasing the amount of gas during the bubbling process improved the flow rate. Also, the results showed that the decreasing trend of the permeate flux at the gassing rate of 1.5 L/min was less than other treatments and more stable

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2022.77642.1190

conditions were seen in the sap flux during the process. Also, the amount of flux in the interrupted form of bubbling showed that after the application of bubbling, although the amount of flux increased, but after that, during the ultra-refining process, the flux decreased again and did not remain constant at that level. But in general, despite the fact that the average flux was higher in the continuous process compared to the interrupted state, there was no significant difference between them. The results related to the amount of membrane fouling after applying the process showed that by applying bubble generation in both continuous and interrupted mods, the fouling was significantly reduced compared to the usual state of ultrafiltration. Also, as the amount of gas entering the feed stream increased, the membrane fouling decreased, which was slightly higher in the continuous state than in the interrupted mod. The overall hydrodynamic resistance of the membrane in different filtration modes showed that the difference between the overall resistance of the membrane in the ultrafiltration and the ultrafiltration process with gasification is quite significant. However, although the overall resistance of the membrane in the interrupted gassing state is higher than its continuous state due to more clogging, there is no significant difference between them ($P<0.05$).Since the flux changes and the amount of gel layer formation affect the properties of the purified syrup, the properties of the syrup were also investigated in the best flux created in two continuous and interrupted modes. The results showed that the continuous flow of gasification caused a small defect in the purification properties such as purity, color and turbidity due to the improvement of the permeate flow flux, which of course can be ignored in the sugar industry due to the improvement of the permeate flow flux.

Conclusion

Therefore, in general, it can be said that the discontinuous method, due to less gas consumption during bubbling and no significant difference in the amount of flux compared to the continuous mode, can be considered as the optimal mode of gasification during the experiments conducted in this research be placed.

Keywords: Bubbling, Concentration polarization, Purity, Raw juice, Ultrafiltration

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
https://ifstrj.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۲۰، شماره ۱، فروردین- اردیبهشت ۱۴۰۳، ص.۷۴-۶۳

ارزیابی فرآیند حباب‌زایی در کاهش گرفتگی غشاء فراپالایش و کارایی آن طی تصفیه شربت خام چغندر

مصطفی سلیمانی[1]- وحید حکیم‌زاده[2*]- مصطفی شهیدی نوقابی[3]- اکرم آریان فر[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۶

چکیده

حذف مطلوب ناخالصی‌ها و رنگبری مناسب شربت خام و رقیق در کارخانجات قند به‌عنوان فرآیندهای مهم و اساسی برای حصول به شکری با کیفیت ممتاز تلقی می‌شود. فرآیندهای دوستدار محیطزیست همچون فرآیندهای غشایی، پتانسیل جایگزینی کامل یا جزیی با برخی فرآیندهای قدیمی صنعت قند را داراست. اما با این‌حال گرفتگی غشاء و کاهش شار از چالش‌های پیش روی این فرآیند می‌باشد. یکی از روش‌های کاهش گرفتگی و بهبود شار حباب‌زایی در جریان ورودی غشاء به‌منظور ایجاد جریان متلاطم و در نتیجه کاهش پدیده‌ی پلاریزاسیون غلظت است. در این تحقیق از تزریق گاز نیتروژن به‌منظور حباب‌زایی در جریان ورودی شربت خام طی تصفیه آن با فرآیند فراپالایش استفاده شد و کارایی غشاء مانند بهبود شار جریان تراوه، میزان گرفتگی غشاء، مقاومت غشاء و همچنین خصوصیات شربت تصفیه شده مورد بررسی قرار گرفت. طی فرآیند حباب‌زایی و با افزایش مقدار گاز نیتروژن از ۰/۵ تا ۱/۵ لیتر بر دقیقه شار جریان تراوه بهبود و در کل گرفتگی غشاء کاهش پیدا کرد. این کاهش در جریان مداوم گازدهی نسبت به روش منقطع مشهود بود. همچنین نتایج نشان داد که جریان مداوم گازدهی به سبب بهبود شار جریان تراوه تاحدودی در خصوصیات تصفیه مانند خلوص، رنگ و کدورت خلل ایجاد کرد.

واژه‌های کلیدی: پلاریزاسیون غلظت، حباب زایی، خلوص، شربت خام، فراپالایش

مقدمه

حذف مطلوب ناخالصی‌ها و رنگبری از شربت خام و رقیق در کارخانجات قند به‌عنوان فرآیندهای مهم و اساسی برای حصول به شکری با کیفیت ممتاز تلقی می‌شود. فرآیندهای مرسوم مانند آهک زنی- کربناسیون، فیلترهای خلاء و دکانتور و استفاده از ترکیبات شیمیایی کمک صافی و رنگبر علاوه بر صرف انرژی بالا و آلودگی محیطزیست، مستلزم هزینه‌ی بالا و کنترل مصرف دقیق آن‌هاست (Hakimzadeh *et al.*, 2017). از این رو پتانسیل فرآیندهای نوینی همچون فرآیندهای غشایی که دوستدار محیطزیست نیز می‌باشد، در قسمت‌های مختلف صنعت قند به صورت جایگزینی کامل یا به شکل ترکیبی مورد استفاده قرار گرفته است (Hakimzadeh *et al.*, 2006; Noghabi *et al.*, 2011; Harun & Zimmerman, 2018). علی رغم کسب نتایج مطلوب در کاهش انرژی، تصفیه ناخالصی‌ها و حذف ترکیبات رنگی به کمک فرآیند غشایی، مهمترین دغدغه و چالش پیش رو برای استفاده از این تکنولوژی پدیده‌ی گرفتگی[4] غشاء و در نتیجه کاهش شار تراوه عنوان شده است (Zhang *et al.*, 2021; Gul & Harasek, 2012). عمده‌ترین دلیل گرفتگی و کاهش شار در انواع غشاء، پدیده‌ی پلاریزاسیون غلظت[5] است که به دلیل ایجاد گرادیان

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی مقطع دکتری و دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: v.hakimzadeh@yahoo.com)
۳- دانشیار، گروه شیمی مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2022.77642.1190
4- Fouling
5- Concentration Polarization

غلظت در ترکیبات خوراک و تراوه در سطح غشاء اتفاق می‌افتد (گرفتگی برگشت‌پذیر). به مرور با افزایش ضخامت لایه‌ی ایجاد شده در سطح غشاء، ترکیبات به داخل حفرات غشاء نیز رسوب می‌کنند که به‌عنوان گرفتگی برگشت‌ناپذیر تلقی می‌شود (Baker, 2004; Casani & Bagger, 2000). از روش‌های معمول برای رفع گرفتگی در غشاء می‌توان به شستشوی مستقیم[1]، شستشوی معکوس[2]، استفاده از شوینده‌های شیمیایی و یا آنزیمی اشاره کرد که هر کدام دارای معایبی از جمله تخریب زود هنگام غشاء, آلودگی‌های زیست‌محیطی، باقیماندن مواد شوینده در غشاء و محصول به‌ویژه در صنایع داروئی و غذایی و افزایش هزینه‌های تولید هستند (Maskooki *et al.*, 2010; Shahraki *et al.*, 2016). از طرفی تکنیک‌های به‌روزتری همچون استفاده از میدان پالس الکتریکی می‌تواند منجر به الکترولیز و تولید گاز و یا تغییر pH و خوردگی در مدول شود (Li *et al.*, 2002). حکیم‌زاده و همکاران (Hakimzadeh *et al.*, 2017) نیز از تکنیک فراپالایش ارتقاء یافته با مواد فعال سطحی (MEUF)[3] برای بهبود شار تراوه غشاء فراپالایش برای تصفیه شکر خام نیشکر استفاده کردند که علی‌رغم حصول نتایج مناسب می‌توان به محدودیت‌هایی همچون استفاده از مواد فعال سطحی[4] در آن روش اشاره کرد. بنابراین به‌نظر می‌رسد روش‌های فیزیکی همچون پیش‌فیلتراسیون خوراک ورودی، استفاده از جریان‌های مغشوش و پالسی برای جلوگیری از فشردگی بیش از حد لایه ژلی تشکیل شده بر سطح غشاء مؤثرتر و دارای معایب کمتری باشد. یکی از روش‌های تغییر نحوه‌ی جریان خوراک ورودی به سطح غشاء، حباب زایی[5] است که سبب ایجاد اختلاط در جریان و افزایش تنش برشی مماسی[6] می‌شود. در واقع نیروی هیدرودینامیکی که حباب ایجاد می‌کنند هم سبب نیروی کشش[7] و هم نیروی بالابر[8] شده و منجر به حذف گرفتگی‌ها می‌شود (Eliseus & Bilad, 2017; Fouladitajar *et al.*, 2013). طی تحقیقات متعدد انجام شده بر روی انواع غشاء، نصب سیستم‌های حباب‌زا می‌تواند نفوذپذیری غشاء را تا ۳۰-۲۰ درصد افزایش دهد (Jankhah & Berube, 2014). دو عامل مهم مؤثر بر کاهش گرفتگی غشاء طی فرآیند حباب‌زایی اندازه حباب و توزیع آن در مدول غشایی است (Radaei *et al.*, 2018). مطالعات مختلفی همچون کاهش گرفتگی غشاءهای صفحه‌ای غوطه‌ور شده در معرض حباب‌زایی در بیوراکتورها (Ndinisa & Fane, 2006)، بهبود جریان تراوه در فراپالایش کنستانتره گیلاس (Shahraki *et al.*, 2017) و بهبود گرفتگی غشاء گرفته شده با آب دریا توسط حباب زایی با نوسان سیال (Harun & Zimmerma, 2018) صورت گرفته که در آنها مؤثر بودن این روش در کاهش گرفتگی و بهبود شار جریان تراوه به اثبات رسیده است.

در این تحقیق از جریان حباب زایی طی تصفیه شربت خام چغندر با فراپالایش استفاده شد و در آن کارایی غشاء مانند بهبود شار جریان تراوه، میزان گرفتگی غشاء، مقاومت غشاء و همچنین خصوصیات شربت تصفیه شده با فرآیند شاهد (بدون حباب زایی) مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها

پایلوت غشایی

در این تحقیق از یک پایلوت غشایی ساخت شرکت پیشتاز نانوفناور توس (ساخت ایران)، با مادول مسطح (قاب و صفحه)، سطح مؤثر ۴۰ سانتی‌متر مربع، حجم تانک خوراک یک لیتر و مجهز به مبدل حرارتی صفحه‌ای برای تثبیت دما در حدود دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد حین فرآیند استفاده شد. در این آزمایشات از غشاء اولترافیلتر از جنس پلی‌اتر سولفون (سپرو، آمریکا) با MWCO=۱۰KDa استفاده شد. فشار در عرض غشاء مورد نظر در این آزمایشات حدود ۳/۵ بار در نظر گرفته شد که از طریق میانگین فشار ورودی خوراک و فشار خروجی ناتراوه از غشاء محاسبه می‌شد. جریان تراوه و ناتراوه به تانک خوراک برگشت داده می‌شد تا شار پایداری ایجاد گردد. شربت خام چغندر مورد استفاده از شرکت قند شیروان تهیه گردید که در ابتدا یک مرحله پیش‌تصفیه را (به منظور حذف ذرات درشت سوسپانسیونی) با فرآیند ریزپالایش پشت سر گذاشت. خصوصیات شربت خام چغندر ریزپالیده شده (خوراک فرآیند فراپالایش) توسط غشاء مورد استفاده در جدول ۱ دیده می‌شود.

فرآیند حباب‌زایی

به‌منظور بررسی اثر حباب‌زایی بر میزان گرفتگی و کارایی غشاء حین فرآیند فراپالایش از گاز نیتروژن به‌طور مستقیم در مسیر خوراک ورودی و با استفاده از یک نازل با قطر منفذ حدود ۱۰۰ میکرون و مقادیر ۰/۵، ۱ و ۱/۵ لیتر بر دقیقه استفاده شد. فرآیند حباب‌زایی به دو صورت پیوسته و منقطع صورت گرفت. به این شکل که در حالت منقطع پس از هر ۳ دقیقه فیلتراسیون، به مدت یک دقیقه فرآیند فیلتراسیون با گازدهی صورت می‌گرفت.

آزمون‌های کارایی غشاء

اندازه‌گیری شار جریان تراوه

1- Forward Flushing
2- Back Flushing
3- Micelle Enhanced Ultra Filtration
4- Surfactant
5- Bubbling
6- Tangential Shear Stress
7- Drag Force
8- Lift Force

برای این منظور از یک ترازوی دیجیتالی استفاده شد که از طریق آن وزن جریان تراوه در بازه‌ی زمانی یک دقیقه ایی اندازه‌گیری و سپس با رابطه (۱) میزان شار تعیین گردید (Mirzaei & Mohammadi, 2012).

$$J = \frac{Permeate\ Weight_{t} - Permeate\ Weight_{t-1}}{Surface\ membrane \times time\ intervals}$$ (۱)

اندازه‌گیری مقاومت کلی غشاء

مقاومت هیدرواستاتیکی غشاء بر اساس قانون دارسی از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$R_H = R_m + R_f = \frac{\Delta P}{\mu J}$$ (۲)

جدول ۱- خصوصیات شربت خام چغندر میکروفیلتر شده

Table 1- Properties of micro-filtrated raw beet juice

خصوصیات Properties	رنگ Color (ICUMSA)	کدورت Turbidity (IU)	خلوص Purity (%)
مقدار Value	3250	18.36	88

که در این رابطه Rm مقاومت غشاء و R_f مقاومت کیک و مقاومت‌گرفتگی (مقاومت برگشت‌پذیر و برگشت ناپذیر)، ΔP فشار در عرض غشاء، μ ویسکوزیته‌ی پرمیت و J شار جریان تراوه می‌باشد. مقاومت غشاء (Rm) مربوط به میزان شار آب دیونیزه طی فرآیند با غشاء جدید قبل از فرآیند و مقاومت گرفتگی مربوط به اختلاف گرفتگی قبل و بعد از پاک کردن لایه کیک از روی غشاء می‌باشد (Shahraki *et al*., 2017; Ceron *et al*., 2012).

.

اندازه‌گیری میزان گرفتگی غشاء

میزان گرفتگی غشاء با محاسبه شار آب خالص قبل (Jwp) و بعد (Jp) از فرآیند در دما و فشار یکسان و از طریق رابطه ۳ محاسبه می‌شود (Shaharki *et al*., 2016).

$$Fouling\ Percentage = (1 - \frac{Jwp}{Jp}) \times 100$$ (۳)

آزمون‌های کیفیت شربت تصفیه شده

خلوص

خلوص جریان تراوه با توجه به میزان قند موجود در جریان تراوه (pol) نسبت به کل مواد جامد جریان تراوه (Brix) که با دستگاه ساکاریمتر (مدل NIR W2، آلمان) بدست آمد از رابطه ۴ اندازه‌گیری گردید (Shahidi & Razavi, 2014).

$$Purity(\%) = (\frac{Pol}{Brix}) \times 100$$ (۴)

رنگ

برای اندازه‌گیری رنگ جریان تراوه ابتدا pH آن به ۷ ±۰/۱ رسانده شد. بعد از آن محلول با کاغذ صافی (با اندازه منافذ ۰/۴۵ میکرومتر) صاف شد و جذب آن در طول موج ۴۲۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید. همچنین با محاسبه‌ی میزان مواد جامد رفراکتومتری[1] و رابطه ی تجربی ۵ دانسیته محلول نیز تعیین و نهایتاً رنگ شربت براساس واحد ایکومزا از طریق رابطه‌ی ۶ محاسبه گردید (Hakimzadeh *et al*., 2017):

$$\rho = (0.0055 \times RDS) + 0.9714$$ (۵)

$$Color = \frac{10^5 \times A}{b \times RDS \times [(0.0055 \times RDS) + 0.9714]}$$ (۶)

که A میزان جذب نور محلول در طول موج ۴۲۰ نانومتر، b طول سل، ρ دانسیته محلول و RDS درصد ماده جامد رفراکتومتری یا همان بریکس شربت می‌باشد.

کدورت

کدورت جریان تراوه براساس واحد NTU مستقیماً با دستگاه کدورت‌سنج (Lotron®, Taiwan) اندازه‌گیری شد (Hakimzadeh *et al*., 2017).

تجزیه و تحلیل آماری

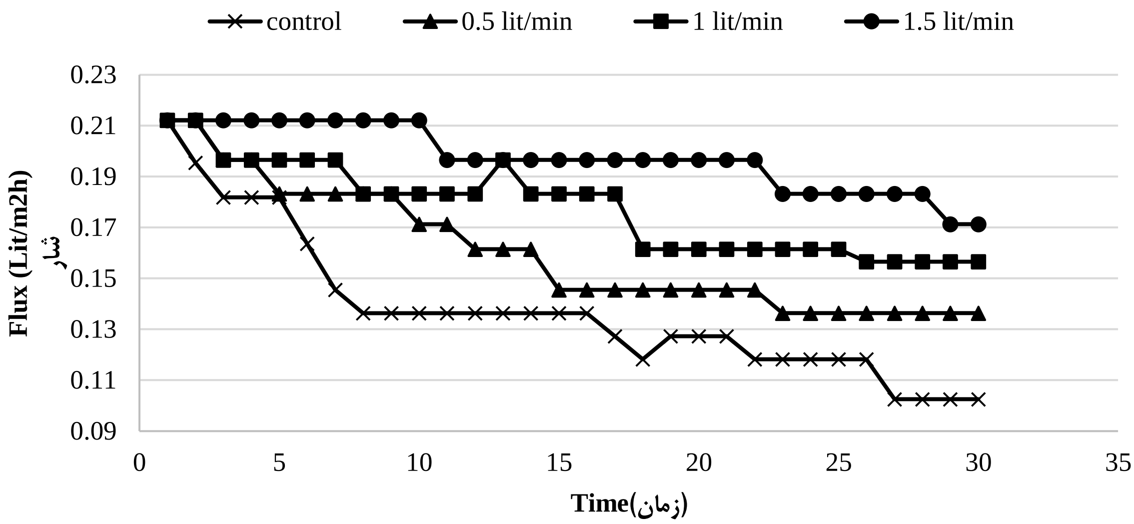
در این تحقیق اثر سه مقدار از جریان گاز نیتروژن در دو حالت منقطع و مداوم حین فراپالایش شربت خام چغندرقند بر کارایی غشاء و خصوصیات شربت تصفیه شده در قالب طرح کاملا تصادفی بررسی شد و با شرایط فیلتراسیون شاهد (بدون حباب‌زایی) مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۲). نتایج حاصل از این پژوهش با استفاده از نرم‌افزارهای SAS

1- Refractometry Dry Solid Matter (RDS)

(نسخهٔ ۹.۱) و Microsoft Office Excel نسخهٔ ۲۰۱۹ مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. میانگین داده‌های هر آزمون در سه تکرار با آزمون حداقل اختلاف معنی‌داری[1] (LSD) در سطح ۹۵ درصد انجام مقایسه شد.

جدول ۲- متغیرهای به‌کاررفته در طرح کاملاً تصادفی
Table 2- The variables used in the completely randomize design

تیمارها Treatments	متغیرها Variables: مقدار گاز ورودی The amount of incoming gas (Lit/min)	متغیرها Variables: نحوه‌ی اعمال Type of Process Application
T1 (تیمار ۱)	0.5	Continues (مداوم)
T2 (تیمار ۲)	1	Interrupted (منقطع)
T3 (تیمار ۳)	1.5	Continues (مداوم)
T4 (تیمار ۴)	0.5	Interrupted (منقطع)
T5 (تیمار ۵)	1	Continues (مداوم)
T6 (تیمار ۶)	1.5	Interrupted (مداوم)
Control (شاهد)	Without application (بدون کاربرد)	Without application (بدون کاربرد)



شکل ۱- شار جریان تراوه در مقادیر مختلف گاز نیتروژن طی حباب زایی در حالت پیوسته
Fig. 1. Permeation flux in different amounts of nitrogen gas during bubbling in continuous mode

نتایج و بحث

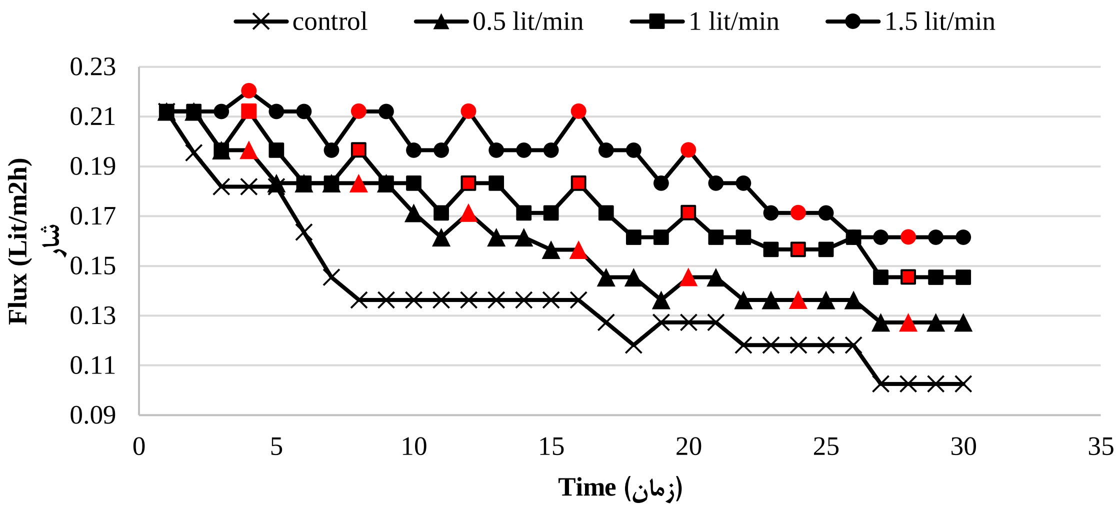
کارایی غشاء

همانطور که در شکل ۱ دیده می شود، افزایش میزان گاز طی فرآیند حباب‌زایی سبب بهبود شار جریان تراوه شد. همچنین نتایج نشان داد که روند کاهشی میزان شار تراوه در میزان گازدهی ۱/۵ لیتر بر دقیقه از سایر تیمارها کمتر بوده و شرایط پایدارتری در شار جریان تراوه طی زمان فرآیند دیده شد.

نتایج میزان شار در حالت حباب‌زایی به شکل منقطع نشان داد (شکل ۲) که پس از اعمال حباب‌زایی با وجود اینکه مقدار شار افزایش می‌یافت اما پس از آن و طی فرآیند فراپالایش مجددا شار کاهش پیدا می‌کرد و در آن حد ثابت نمی‌ماند. به‌عبارت دیگر اعمال مقطعی حباب زایی نتوانست به‌طور پایداری شار را افزایش دهد. همچنین نتایج نشان

1- Least Significant Difference

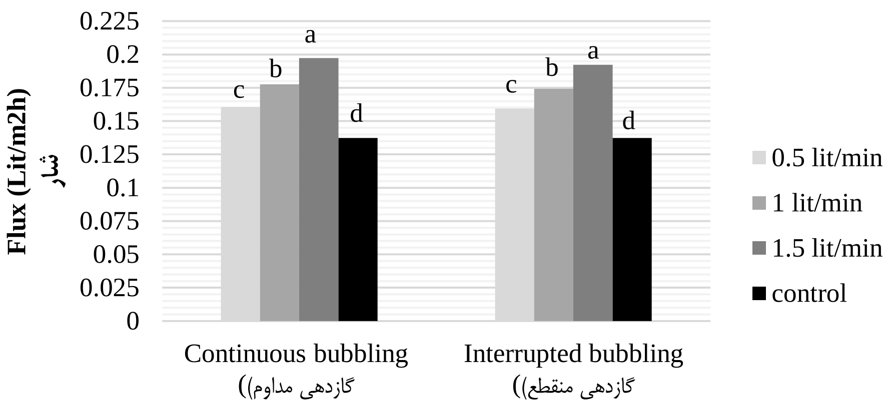
داد هر چه به انتهای فرآیند نزدیک می‌شدیم، اعمال مقطعی حباب‌زایی نمی‌توانست شار را افزایش دهد. احتمالاً در انتهای فرآیند به دلیل فشرده شدن لایه ژلی، اعمال گازدهی در بهبود شار مؤثر نبوده است. اما در کل با وجود بالاتر بودن میانگین شار در فرآیند مداوم نسبت به حالت منقطع تفاوت معنی‌داری بین آن‌ها وجود نداشت (شکل ۳).



شکل ۲- شار جریان تراوه در مقادیر مختلف گاز نیتروژن طی حباب‌زایی در حالت منقطع

(نقاط قرمز بیانگر زمان اعمال گازدهی می‌باشد)

Fig. 2. Permeation flux in different amounts of nitrogen gas during bubbling in the interrupted state



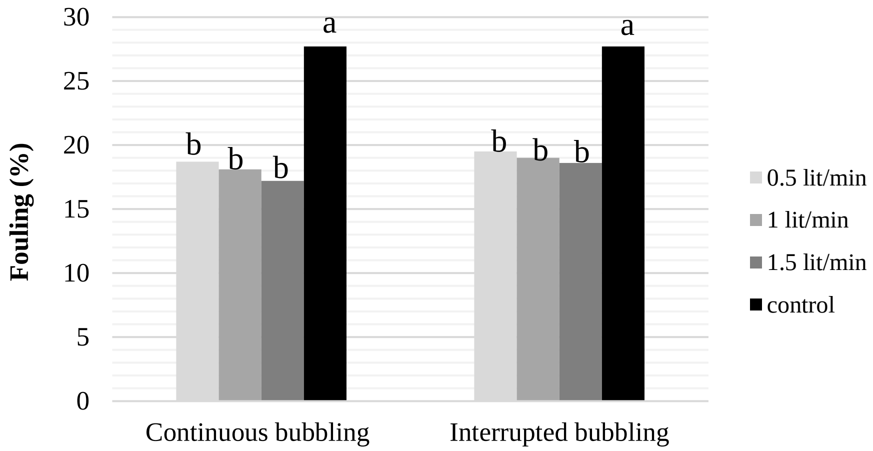
شکل ۳- مقایسه میانگین شار جریان تراوه در مقادیر مختلف گاز نیتروژن طی حباب‌زایی در حالت منقطع و مداوم

Fig. 3. Comparison of the average permeate flux in different amounts of nitrogen gas during bubbling in interrupted and continuous mode

نتایج مربوط به میزان گرفتگی غشاء بعد از اعمال فرآیند نشان داد که با اعمال حباب‌زایی به هر دو روش مداوم و منقطع، گرفتگی به‌طور معنی‌داری نسبت به حالت معمول فراپالایش کاهش پیدا کرد. همچنین هرچه میزان گاز ورودی به جریان خوراک بیشتر شد گرفتگی غشاء نیز کاهش یافت که این مقدار کاهش در حالت مداوم نسبت به حالت منقطع کمی بیشتر بود (شکل ۴).

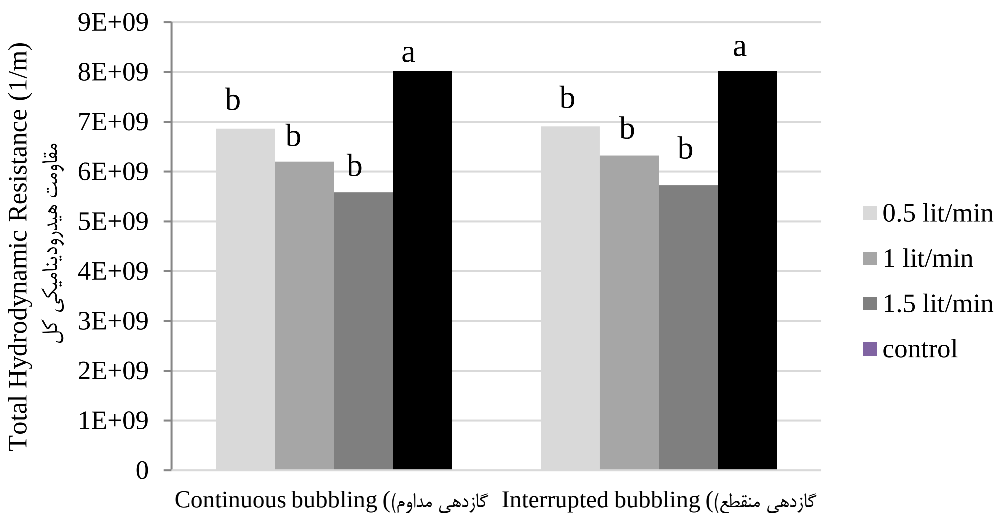
هرگونه اخلال در تشکیل لایه مرزی در نزدیک سطح غشاء می‌تواند منجر به بهبود شار در فرآیند غشایی شود. یکی از این موارد افزایش سرعت جریان عرضی غشاء و متعاقب آن ایجاد جریان آشفته

است که با افزایش میزان گازدهی بیشتر می‌شود. از طرفی ایجاد جریان مغشوش طی حباب‌زایی سبب کاهش پدیده‌ی پلاریزاسیون غلظت می شود. تنش سطحی ایجاد شده در اثر حباب‌زایی در جدا شدن رسوبات از سطح غشاء بسیار مفید ظاهر می‌شوند (Shahraki *et al*., 2016; Li *et al*., 2014). وقتی سرعت جریان گازدهی افزایش پیدا می‌کند اندازه حباب‌ها افزایش می‌یابد. حباب‌های بزرگ‌تر در جریان خوراک موجب ایجاد اغتشاش بیشتر شده و شار افزایش می‌یابد. اگر چه حباب های بسیار بزرگ نیز می‌تواند به‌عنوان یک بالشتک بر روی منافذ غشاء قرار بگیرد و مانع رسیدن محلول به سطح غشاء شوند که خود سبب کاهش شار می‌شود (Qaisrani & Samhaber, 2011). هارون و زیمرمن (Harun & Zimmerman, 2019) حذف لایه‌ی تشکیل شده بر سطح غشاء طی فرآیند حباب‌زایی را آزاد شدن انرژی محبوس در حباب‌ها طی ترکیدن‌شان در سطح غشاء عنوان کردند. قدیمخانی و همکاران (Ghadimkhani *et al*., 2016) نیز بیان داشتند که رادیکال های آزاد OH که در اثر ترکیدن حباب‌های ریز و پرانرژی ایجاد می‌شود می تواند با ترکیبات آلی در غشاء گرفته پیوند برقرار سازد و سبب شکستن ساختار آن‌ها گردد.



شکل ٤- مقایسه میزان گرفتگی غشاء پس از فرآیند فراپالایش همراه با مقادیر مختلف گازدهی با حالت بدون گازدهی

Fig. 4. Comparison of the amount of membrane fouling after the ultrafiltration process with different amounts of gassing with no gassing

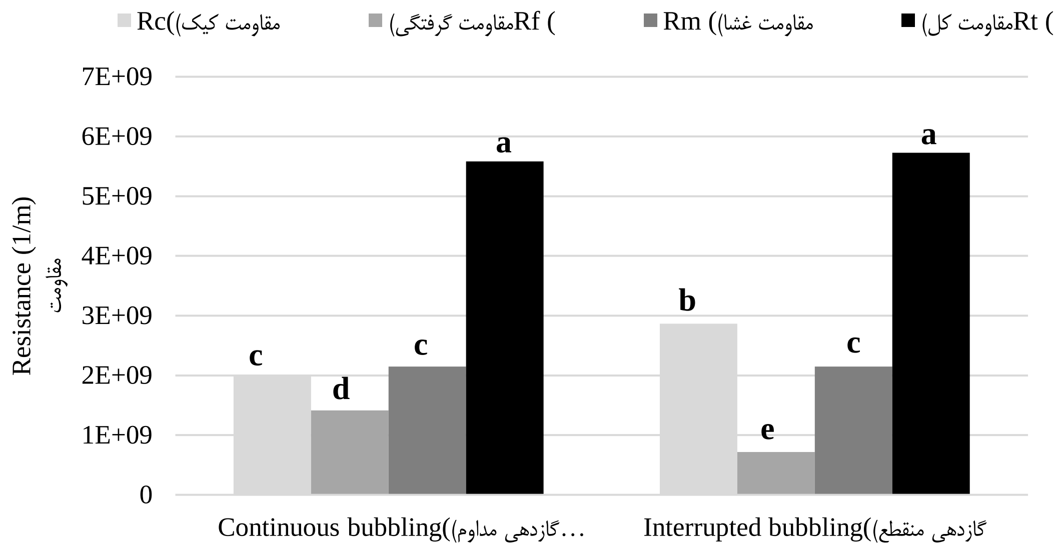


شکل ٥- مقایسه میزان مقاومت هیدرودینامیکی کل غشاء طی فرآیند فراپالایش همراه با مقادیر مختلف گازدهی در دو حالت گازدهی مداوم و منقطع

Fig. 5. Comparison of the hydrodynamic resistance of the entire membrane during the ultrafiltration process with different amounts of gassing in two continuous and interrupted gassing modes

مقاومت کلی هیدرودینامیکی غشاء در حالت‌های مختلف فیلتراسیون نشان داد (شکل ۵) که اختلاف بین مقاومت کلی غشاء در حالت فراپالایش به تنهایی با فرآیند فراپالایش همراه با حباب‌زایی کاملا معنی‌دار است. همچنین با افزایش میزان گاز طی حباب‌زایی به سبب بهبود کارایی غشاء و افزایش شار طبق رابطه‌ی دارسی میزان مقاومت کلی هیدرودینامیکی نیز کم می‌شود. با این حال هرچند میزان مقاومت کلی غشاء در حالت گازدهی منقطع از حالت مداوم آن به دلیل گرفتگی بیشتر، بالاتر است اما اختلاف معنی‌داری بین آن‌ها وجود ندارد ($P<0.05$).

با بررسی میزان مقاومت لایه کیک و گرفتگی مطابق شکل ۶ می توان نتیجه گرفت که در حالت منقطع گسترش لایه کیک بیشتر بوده است اما در حالت مداوم به دلیل ادامه‌دار بودن فرآیند گازدهی که سبب عدم اجازه‌ی تشکیل لایه کیک بر روی سطح غشاء بوده است، گرفتگی بیشتر مربوط به قرار گرفتن ذرات داخل حفرات غشاء بوده است. در واقع در حالت گازدهی منقطع چون فرصت تشکیل لایه کیک داده شده است، این لایه همانند یک غشاء ثانویه عمل کرده و اجازه رسوب ذرات ریزتر بر سطح داخلی حفرات را نداده است.



شکل ٦- مقایسه میزان مقاومت گرفتگی، غشاء و لایه کیک در دو حالت گازدهی مداوم و منقطع

Fig. 6. Comparison of fouling resistance, membrane and cake layer in two continuous and interrupted gassing modes

خصوصیات تصفیه شربت‌خام

خصوصیات شربت تصفیه شده یا همان جریان تراوه حاصل از فرآیند فراپالایش پس از ۳۰ دقیقه فرآیند مورد بررسی قرار گرفت. طی فرآیند فراپالایش خلوص شربت نسبت به خوراک ورودی که همان شربت خام ریزپالیده بود حدود ۱/۹ درصد افزایش پیدا کرد و به حدود ۸۹/۹ درصد رسید. بهبود خلوص شربت وقتی در فرآیند فراپالایش به همراه حباب زایی مداوم بررسی شد نشان داد که با افزایش میزان گازدهی خلوص شربت کمتر بوده بطوری‌که در بیشترین مقدار گاز طی حباب‌زایی به حدود ۸۹/۲ رسید که این امر به دلیل سرعت پایین تشکیل لایه ژلی بر روی سطح غشاء بر اثر فرآیند حباب‌زایی است. تشکیل لایه ژلی یا پلاریزاسیون غلظت می‌تواند به‌عنوان یک غشاء ثانویه عمل کند و درصد دفع ترکیبات درشت و نامحلول را افزایش دهد (Briao *et al.*, 2017). از طرفی با بهبود میزان شار تراوه ضریب نفوذ در غشاء افزایش یافته و دفع مواد غیرساکارزی افزایش می‌یابد (Hakimzadeh *et al.*, 2017). نتایج مربوط به درجه‌ی خلوص طی فرآیند فراپالایش به همراه فرآیند حباب‌زایی منقطع نیز نشان داد که در مقایسه با حباب‌زایی مداوم تفاوت معنی‌داری نداشته و در بیشترین مقدار گازدهی یعنی ۱/۵ لیتر بر دقیقه خلوص به ۸۹/۳ رسید (جدول ۳). در حالت حباب‌دهی منقطع اگر چه وقفه‌ایی کوتاه در فرآیند گازدهی سبب گسترش کمی بیشتر در تشکیل لایه پلاریزاسیون و کاهش شار شد اما در میزان خلوص شربت تفاوت معنی‌داری ایجاد نکرد. احتمالاً وقفه‌ی یک دقیقه‌ایی در گازدهی آنقدر در تشکیل لایه ژلی که بتواند همانند غشاء عمل کند مؤثر نبوده است.

کدورت یکی از فاکتورهای مهم در تعیین ویژگی‌های تصفیه شربت درکارخانجات قند است. معمولا افزایش کدورت سبب کاهش کریستالیسزاسیون می‌شود. عمده کدورت ناشی از ترکیباتی با سایز کمتر از ۱ میکرومتر است که بیشتر از اگزالات، کلسیم باقی مانده از فرآیند تصفیه، مخمرها و پکتین ناشی می‌شود (Abdel-Rahman & Feloeter, 2016; Kuljanin *et al*., 2018). با توجه به سایز ذرات ایجاد کننده کدورت تشکیل لایه ژلی در سطح غشاء در حذف آن از شربت بسیار موثر است. بنابراین همان‌طور که نتایج بدست آمده نیز نشان داد با وجود کاهش کدورت از ۱۸/۳۶ واحد به ۹/۵ طی فراپالایش شربت خام میکروفیلتر شده، همراه شدن فرآیند حباب‌زایی با فراپالایش در بیشترین مقدار گاز ورودی، به سبب کاهش تشکیل لایه ژلی و کمی بهبود در میزان شار، حذف کدورت را به‌ترتیب در حالت مداوم و منقطع به ۱۰/۲ و ۸/۷ واحد رساند. همچنین حکیم زاده و همکاران (Hakimzadeh *et al*.,2017) نیز طی تصفیه شکرخام به روش فراپالایش بهبود یافته با مواد فعال سطحی، افزایش کدورت را ناشی از افزایش شار جریان تراوه به دلیل افزایش فشار یا دما طی فرآیند دانستند.

جدول ۳- مقایسه خصوصیات شربت تصفیه شده به روش فراپالایش و گازدهی-فراپالایش با شربت اولیه و شربت تصفیه شده به روش مرسوم آهک زنی -کربناتاسیون

Table 3- Comparison of the properties of syrup filtered by ultrafiltration and gassing-ultrafiltration method with primary syrup and syrup filtered by conventional liming-carbonation method

نوع تیمار/شربت Treatments/Juice	خصوصیات تصفیه Refining Properties		
	خلوص (٪) Purity (%)	رنگ (ایکومزا) Color (ICUMSA)	کدورت Turbidity (IU)
شربت خام ورودی (میکروفیلتر شده) Feed	88	3250	18.36
تراوه‌ی فراپالایش بدون اعمال حباب‌زایی Permeate of UF without bubbling	89.9	1458	9.5
تراوه‌ی فراپالایش با گازدهی مداوم Permeate of UF (continues mode)	89.2	1495	10.2
تراوه‌ی فراپالایش با گازدهی منقطع permeate of UF (interrupted mode)	89.3	1471	8.7
شربت تصفیه شده به روش مرسوم Refined Juice in Traditional Mode	90.3	2120	12.6

عمده‌ترین ترکیبات رنگی موجود در شربت خام چغندر ملانین‌ها هستند که محصول واکنش‌های قهوه‌ای شدن آنزیمی طی خلال کردن چغندر بوده و وزن ملکولی آن‌ها در حدود ۲ تا ۵ کیلودالتن است. این ترکیبات در آب نامحلول هستند. کاتکول آمین‌ها نیز از ترکیبات پیش‌ساز مهم رنگ در شربت خام چغندر هستند. بیشتر این ترکیبات بوسیله جذب سطحی از شربت جداسازی می‌شوند (Bahrami & Honarvar, 2017). با توجه به وزن ملکولی این ترکیبات و اندازه حفرات غشاء به کار رفته کاملاً بدیهی است که امکان جذب و جداسازی این ترکیبات به‌طور کامل در فرآیند فراپالایش وجود ندارد و تنها گسترش لایه ژلی و پلاریزاسیون قطبی می‌تواند در حذف و جذب آن بین سایر ترکیبات رسوب کرده بر سطح غشاء مؤثر باشد. همانطور که در نتایج موجود در جدول ۳ نیز می‌توان به وضوح مشاهده کرد فرآیند فراپالایش در پایان ۳۰ دقیقه فرآیند رنگ را به ۴۳۲ واحد ایکومزا کاهش داد اما فرآیند فراپالایش توام با گازدهی و حباب زایی نرخ کاهش رنگ کمتری را درشربت خام ورودی به فرآیند ایجاد نمود که مربوط به ممانعت از ایجاد لایه ژلی مستحکم بر اثر تلاطم و ایجاد جریان مغشوش جریان خوراک بر سطح غشاء می‌باشد.

نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق بررسی تأثیر حباب‌زایی جریان خوراک ورودی بر کارایی غشاء فراپالایش طی تصفیه شربت خام چغندرقند بود. طی فرآیند حباب‌زایی و با افزایش مقدار گاز نیتروژن از ۰/۵ تا ۱/۵ لیتر بر دقیقه به سبب ایجاد جریان متلاطم در جریان خوراک شار جریان تراوه بهبود و در کل گرفتگی غشاء کاهش پیدا کرد که یکی از دغدغه‌های مهم در بکارگیری این فرآیند نوین در صنعت قند است. از آنجایی‌که تغییرات شار و میزان تشکیل لایه ژلی بر خصوصیات شربت تصفیه شده تأثیرگذار است خصوصیات تصفیه شربت نیز در بهترین شار تراوه ی ایجاد شده در دو حالت مداوم و منقطع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که جریان مداوم گازدهی به سبب بهبود شار جریان تراوه کمی در خصوصیات تصفیه مانند خلوص، رنگ و کدورت خلل

ایجاد نمود که البته باتوجه به بهبود شار جریان تراوه می‌تواند در صنعت قند قابل چشم‌پوشی باشد. بنابراین به‌طور کلی می‌توان گفت روش منقطع به دلیل مصرف کمتر گاز طی حباب‌دهی و نداشتن اختلاف معنی‌داری در میزان شار نسبت به حالت مداوم می‌تواند به‌عنوان حالت بهینه‌ی گازدهی طی آزمایشات صورت گرفته در این تحقیق، مدنظر قرار گیرد.

References

1. Abdel-Rahman, E.S., & Floeter, E. (2016). Physico-chemical characterization of turbidity-causing particles in beet sugar solutions. *International Journal of Food Engineering*, *12*(2), 127-137. https://doi.org/10.1515/ijfe-2015-0129
2. Bahrami, M.E., & Honarvar, M. (2017). Identification of colored components produced in sugar beet processing using gel-permeation chromatography (GPC) with UV and RI detection. *Journal of Food Biosciences and Technology*, *7*(2), 19-26.
3. Baker, R.W. (2004). *Membrane Technology and Applications*. 2ndEd.Book.545pp. Membrane Technology Research. Inc.John Wiley &Sons,Ltd.
4. Brião, V.B., Seguenka, B., Zanon, C.D., & Milani, A. (2017). Cake formation and the decreased performance of whey ultrafiltration. *Acta Scientiarum. Technology*, *39*, 517-524. https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i5.27585
5. Casani, S.D., & Bagger-Jørgensen, R. (2000). Cross-flow filtration of Fruit Juice. *Danish Environmental Protection Agency*.
6. Cerón-Vivas, A., Morgan-Sagastume, J.M., & Noyola, A. (2012). Intermittent filtration and gas bubbling for fouling reduction in anaerobic membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*, *423*, 136-142. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.08.008
7. Eliseus, A., & Bilad, M.R. (2017). Improving membrane fouling control by maximizing the impact of air bubbles shear in a submerged plate-and-frame membrane module. *In AIP Conference Proceedings*, (1891)1, 020039. http://doi.org/10.1063/1.5005372
8. Fouladitajar, A., Ashtiani, F.Z., Rezaei, H., Haghmoradi, A., & Kargari, A. (2014). Gas sparging to enhance permeate flux and reduce fouling resistances in cross flow microfiltration. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *20*(2), 624-632. http://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.05.025
9. Ghadimkhani, A., Zhang, W., & Marhaba, T. (2016). Ceramic membrane defouling (cleaning) by air Nano Bubbles. Chemosphere, *146*, 379-384. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.023
10. Gul, S., & Harasek, M. (2012). Energy saving in sugar manufacturing through the integration of environmental friendly new membrane processes for thin juice pre-concentration. *Applied Thermal Engineering*, *43*, 128-133. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.024
11. Hakimzadeh, V., Mousavi, S.M., Elahi, M., & Razavi, S.M.A. (2017). Purification of raw cane sugar by micellar-enhanced ultrafiltration process using linear alkylbenzene sulphonate. *Journal of Food Processing and Preservation*, *41*(3), e12953. https://doi.org/10.1111/jfpp.12953
12. Hakimzadeh, V., Razavi, S.M., Piroozifard, M.K., & Shahidi, M. (2006). The potential of microfiltration and ultrafiltration process in purification of raw sugar beet juice. *Desalination*, *200*(1-3), 520-522. http://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.420
13. Harun, M.H.C., & Zimmerman, W.B. (2019). Membrane defouling using microbubbles generated by fluidic oscillation. *Water Supply*, *19*(1), 97-106. http://doi.org/10.2166/ws.2018.056
14. Jankhah, S., & Bérubé, P.R. (2014). Pulse bubble sparging for fouling control. *Separation and Purification Technology*, *134*, 58-65. http://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.07.023
15. Kuljanin, T., Lončar, B., Filipović, V., Nićetin, M., & Knežević, V. (2018). Pectin separation from sugar beet juice as affected by the pH, amount of Al2 (SO_4) 3 and use of zeta potential/residual turbidity measurement. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, *22*(2), 65-68. http://doi.org/10.5937/JPEA1802065K
16. Li, J., Sanderson, R.D., & Jacobs, E.P. (2002). Ultrasonic cleaning of nylon microfiltration membranes fouled by Kraft paper mill effluent. *Journal of Membrane Science*, *205*(1-2), 247-257. http://doi.org/10.1016/S0376-7388(02)00121-7

17. Li, L., Wray, H.E., Andrews, R.C., & Bérubé, P.R. (2014). Ultrafiltration fouling: Impact of backwash frequency and air sparging. *Separation Science and Technology*, *49*(18), 2814-2823 https://doi.org/10.1080/01496395.2014.948964
18. Maskooki, A., Mortazavi, S.A., & Maskooki, A. (2010). Cleaning of spiralwound ultrafiltration membranes using ultrasound and alkaline solution of EDTA. *Desalination*, *264*(1-2), 63-69. http://doi.org/10.1016/j.desal.2010.07.005
19. Mirzaie, A., & Mohammadi, T. (2012). Effect of ultrasonic waves on flux enhancement in microfiltration of milk. *Journal of Food Engineering*, *108*(1), 77-86. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.07.026
20. Ndinisa, N.V., Fane, A.G., Wiley, D.E., & Fletcher, D.F. (2006). Fouling control in a submerged flat sheet membrane system: Part II—Two-phase flow characterization and CFD simulations. *Separation Science and Technology*, *41*(7), 1411-1445. https://doi.org/10.1080/01496390600633915
21. Noghabi, M.S., Razavi, S.M.A., Mousavi, S.M., Elahi, M., & Niazmand, R. (2011). Effect of operating parameters on performance of nanofiltration of sugar beet press water. *Procedia Food Science*, *1*, 160-164. http://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.025
22. Qaisrani, T.M., & Samhaber, W.M. (2011). Impact of gas bubbling and backflushing on fouling control and membrane cleaning. *Desalination*, *266*(1-3), 154-161. https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.08.019
23. Radaei, E., Liu, X., Tng, K.H., Wang, Y., Trujillo, F.J., & Leslie, G. (2018). Insights on pulsed bubble control of membrane fouling: Effect of bubble size and frequency. *Journal of Membrane Science*, *554*, 59-70. http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2018.02.058
24. Shahidi Noghabi, M., Razavi, S. M. A., & Shahidi Noghabi, M. (2014). Modeling of milk ultrafiltration permeate flux under various operating conditions and physicochemical properties using Nero–Fuzzy method. *Research and Innovation in Food Science and Technology*, *3*(3), 283-296.
25. Shahraki, M.H., Maskooki, A., & Faezian, A. (2017). Ultrafiltration of cherry concentrate under ultrasound with carbonated feed as a new fouling control method. *Journal of Food Processing and Preservation*, *41*(2), e12795. https://doi.org/10.1111/jfpp.12795
26. Shahraki, M.H., Maskooki, A., Faezian, A., & Rafe, A. (2016). Flux improvement of ultrafiltration membranes using ultrasound and gas bubbling. *Desalination and Water Treatment*, *57*(51), 24278-24287. http://doi.org/10.1080/19443994.2016.1141377
27. Zhang, H., Luo, J., Liu, L., Chen, X., & Wan, Y. (2021). Green production of sugar by membrane technology: How far is it from industrialization? *Green Chemical Engineering*, *2*(1), 27-43. https://doi.org/10.1016/j.gce.2020.11.006

.